مهندسی متالورژی و مواد، ۳۳، ٤، ١٤٠١. (٣٨-٢٧)



مهندسی متالورژی و مواد

https://jmme.um.ac.ir/



بررسی تأثیر مقدار تقویت کننده بر روی استحکام فشاری نانوکامپوزیت زمینه آلیاژ آلومینیوم A380 تقویت شده با نانو ذرات کاربید سیلیسیم

مقاله پژوهشی

علی محمدی(۱)　　　محمد علی پور(۲)

DOI: 10.22067/jmme.2022.77789.1064

چکیده *در این مقاله ریز ساختار و استحکام فشاری آلیاژ آلومینیوم A380 با افزودن نانو ذرات SiC (Silicon carbide) مورد بررسی قرار گرفت. پودر آلومینیوم A380 و نانوذرات SiC با مقدارهای (۰/۵، ۱ و ۲ درصد وزنی) در یک دستگاه آسیاب گلوله‌ای سیاره‌ای در اتمسفر آرگون به مدت ۱۰ ساعت آسیاب شدند. نسبت وزن توپ به پودر ۱:۱۰ و سرعت چرخش روی ۲۵۰ دور بر دقیقه تعیین شد. پس از فرآیند آسیاب، از پرس گرم برای تولید نمونه‌ها استفاده شد، محصولات از طریق قالب گرافیتی به قطر ۱۵ میلی متر همزمان با سرعت گرمایش ۱۰ درجه سانتیگراد بر دقیقه تا دمای پخت نهایی ۵۱۰ درجه سانتیگراد با زمان نگهداری ۳۰ دقیقه تحت خلا در فشار ۵۰ مگاپاسکال در دستگاه پرس گرم قرار گرفت. ریز ساختار و فاز های تشکیل شده نمونه‌های تولید شده با استفاده از میکروسکوپ الکترون روبشی (SEM) (Scanning electron microscope) و پراش اشعه‌ی ایکس (XRD) (X-ray diffraction) مورد بررسی قرار گرفت. برای آزمایش استحکام فشاری از دستگاه آزمایش کشش/ فشار یونیورسال (UTM) (universal testing machine) استفاده شد. مشاهده شد با افزایش نانو ذرات SiC اگلومره شدن اتفاق افتادکه باعث کاهش خواص مکانیکی شد. بهترین چگالی و استحکام فشاری نمونه‌ها مربوط به آلیاژ آلومینیوم با ۰/۵ درصد وزنی نانو ذرات SiC به دست آمد همچنین به علت پایین بودن دمای زینترینگ، تجزیه SiC اتفاق نیفتاد و ترکیب بین فلزی آلومینیوم با کربن یا آلومینیوم با سیلیسیم تشکیل نشد.*

واژه‌های کلیدی آلیاژ آلومینیوم، کاربید سیلیسیم، کامپوزیت، متالورژی پودر (Powder metallurgy)، استحکام فشاری.

Investigating the Effect of the Amount of Reinforcement on the Compressive Strength of A380 Aluminum Alloy Nanocomposite Reinforced with Silicon Carbide Nanoparticles

Ali Mohammadi　　　Mohammad Alipour

Abstract In this article, the microstructure and compressive strength of A380 aluminum alloy with the addition of SiC (Silicon carbide) nanoparticles were investigated. A380 aluminum powder and SiC nanoparticles with amounts (0.5, 1, and 2 wt%) were milled in a planetary ball mill in an argon atmosphere for 10 hours. The weight ratio of ball to powder was 1:10 and the rotation speed was set at 250 rpm. After the grinding process, a hot press was used to produce samples, the products through a graphite mold with a diameter of 15 mm at the same time with a heating rate of 10 °C/min to a final baking temperature of 510 °C with a holding time of 30 minutes under vacuum at a pressure of 50 MPa was placed in a hot press. The microstructure and formed phases of the produced samples were investigated using scanning electron microscope (SEM) and X-ray diffraction (XRD). Universal testing machine (UTM) was used to test the compressive strength. It was observed that agglomeration occurred with the increase of SiC nanoparticles, which decreased the mechanical properties. The best density and compressive strength of the samples related to aluminum alloy with 0.5% by weight of SiC nanoparticles were obtained. Also, due to the low sintering temperature, SiC did not decompose and the intermetallic compound of aluminum with carbon or aluminum with silicon was not formed

.

Key Words Aluminum alloy, Silicon carbide, Composite, Powder metallurgy, Compressive strength.

* تاریخ دریافت مقاله ١٤٠١/٤/٢٩ و تاریخ پذیرش آن ١٤٠١/٩/٢٦ می‌باشد.

(۱) کارشناسی ارشد، مهندسی مواد، دانشکده مکانیک، گروه مهندسی مواد، دانشگاه تبریز

(۲) استادیار، مهندسی مواد، دانشکده مکانیک، گروه مهندسی مواد، دانشگاه تبریز.

Email: alipourmo@tabrizu.ac.ir

مقدمه

آلومینیوم یکی از مواد مهندسی است که اهمیت ویژه‌ای در صنایع مختلف دارد. آلومینیوم به دلیل داشتن خصوصیاتی مثل چگالی کم، هدایت حرارتی بالا، استحکام نسبت به وزن بالا، مقاومت به خوردگی خوب و اقتصادی بودن به طور گسترده کاربرد دارد، با این حال دارای سختی کم و مقاومت به سایش پایین است [1-3]. افزایش خواص مکانیکی آلومینیوم همواره مد نظر بسیاری از محققین در حوزه‌های مختلف از جمله صنعت خودرو و هوا فضا و الکترونیکی بوده است [4,5]. اضافه کردن عوامل تقویت‌کننده سرامیکی به آلومینیوم و آلیاژهایش موجب افزایش خواص مکانیکی از جمله سختی و مقاومت به سایش و استحکام می‌شود [6,7]. عمده ذرات تقویت‌کننده که به آلیاژهای آلومینیوم اضافه می‌شوند ذرات ارزان قیمت نظیر SiC و Al_2O_3 هست. بنابراین، تولید و کاربرد کامپوزیت‌های زمینه فلزی (MMC)(metal matrix composite) در سال های اخیر افزایش یافته است [1,5]. مسئله پیچیده در ساخت کامپوزیت‌های زمینه فلزی تقویت شده با ذرات سرامیکی، توزیع یکنواخت ذرات در سراسر زمینه بدون تجمع و حداقل واکنش‌های شیمیایی است [8]. متالورژی پودر به عنوان یک روش خوب در تولید کامپوزیت‌های زمینه فلزی در نظر گرفته می‌شود. امروزه استفاده از روش متالورژی پودر برای آلیاژهایی که از دو یا چند فلز با دماهای ذوب متفاوت تشکیل شده است، ساخت قطعات پیچیده با کیفیت و استحکام بالا و توزیع یکنواخت ذرات تقویت کننده، بسیارگسترده است [2,4,9]. این روش شامل سه مرحله مخلوط کردن عناصر پودری، متراکم کردن آن عناصر پودری در قالب در دمای اتاق و سپس حرارت دادن در یک کوره اتمسفر کنترل شده برای ایجاد پیوند بین عناصر پودری است. البته در روش پرس گرم متراکم کردن و حرارت دادن برای ایجاد پیوند بین عناصر، همزمان در محیط خلا اتفاق می‌افتدکه باعث افزایش چگالی و در نتیجه بهبود خواص مکانیکی می شود [2,10].

کاروانیس و همکارانش [11] با بررسی تولید کامپوزیت Al-SiC با روش ریخته‌گری سانتریفیوژ با درصدهای مختلف کاربید سیلیسیم مشاهده کردند با افزایش کاربید سیلیسیم استحکام فشاری و کششی نمونه‌ها افزایش پیدا می‌کند. محمود جان شنل و همکارانش [12] با بررسی خواص مکانیکی کامپوزیت‌های هیبریدی Al-SiC-GNPs (graphene nanoplatelets) به این نتیجه رسیدند با افزایش کاربید سیلیسیم استحکام فشاری نمونه‌ها افزایش پیدا می‌کند. هدف از این تحقیق بهبود استحکام فشاری آلیاژ آلومینیوم A380 با کمک ذرات تقویت‌کننده SiC تولید شده به روش متالورژی پودر است. شرایط بهینه پارامترهای پردازش و مکانیزم‌های تقویت‌کننده را می‌توان از این مطالعه استخراج کرد.

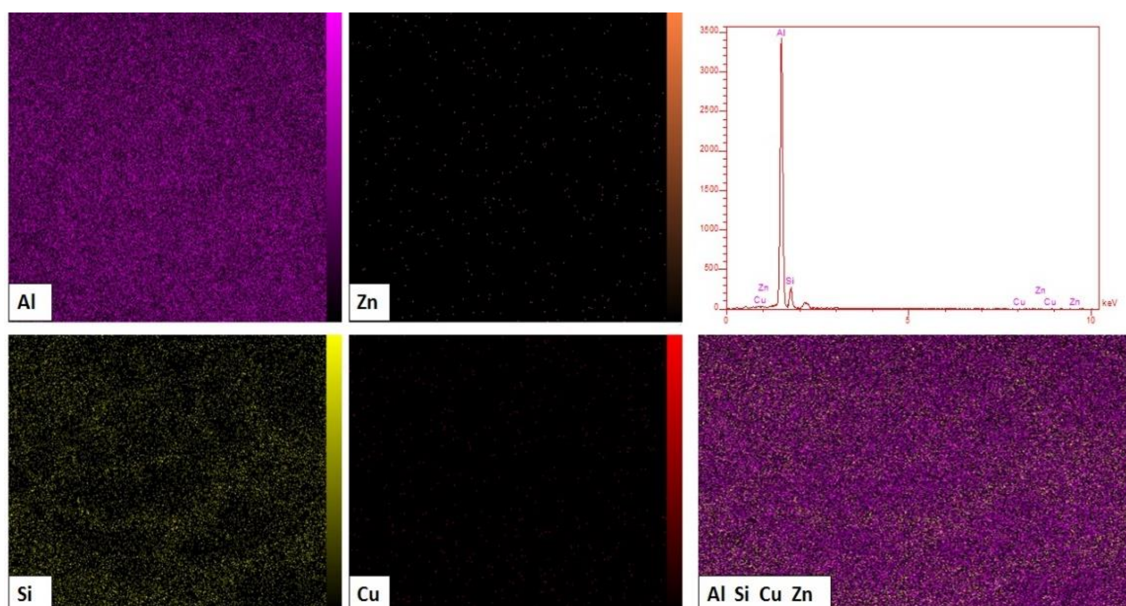
مواد و روش تحقیق

مواد

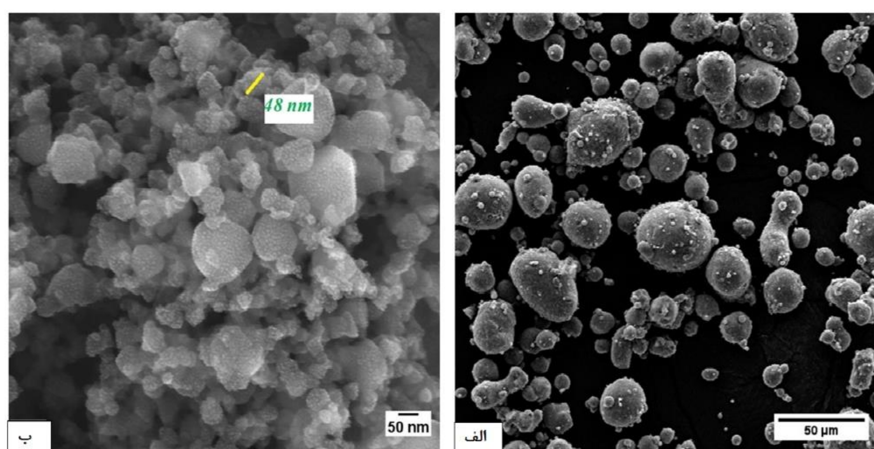
از نظر تجاری، پودر آلیاژ آلومینیوم (Al A380) در محدوده اندازه ~ ۷۰–۳۰ میکرومتر و خلوص ۹۹/۹۵٪ برای زمینه استفاده شد. ترکیب شیمیایی پودر Al A380 در جدول (۱) نشان داده شده است. در شکل (۱) نتایج EDS و آنالیز map پودر آلیاژ Al A380 مشاهده می‌شود. نانوذرات SiC به اندازه ۹۰–۵۰ نانومتر و خلوص ۹۹٪ به عنوان تقویت کننده استفاده شدند. شکل (۲) تصاویر SEM پودرهای آلیاژ آلومینیوم A380 و نانوذرات SiC است.

جدول ۱ ترکیب شیمیایی Al A380

عنصر	آلومینیوم	آهن	سیلیسیم	مس	روی	منگنز	نیکل	قلع	منیزیم
مقدار (درصد وزنی)	بقیه	۱/۳	۸/۵	۳/۵	۳	۰/۵	۰/۵	۰/۳۵	۰/۵



شکل ۱ EDS و آنالیز map پودر آلیاژ Al A380



شکل ۲ تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) مواد اولیه مورد استفاده در این تحقیق: (الف) پودر Al A380 (ب) نانوذرات SiC

ساخت نانوکامپوزیت‌های Al A380-SiC

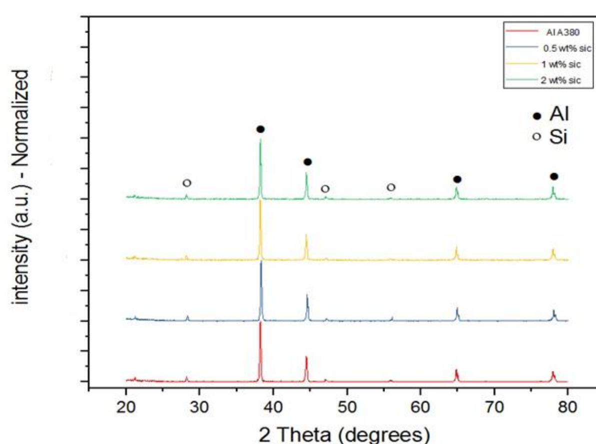
پودر Al A380 و نانوذرات SiC با مقدارهای (۰، ۰/۵، ۱ و ۲ درصد وزنی) در یک دستگاه آسیاب گلوله‌ای سیاره‌ای دو فنجانه با استفاده از گلوله های فولادی سخت شده با قطرهای مختلف (٤ تا ۱۰ میلی متر) در اتمسفر آرگون به مدت ۱۰ ساعت آسیاب شدند. برای محافظت از پودر در برابر اگلومره شدن و جوش سرد، ۲ درصد وزنی اسید استئاریک به عنوان یک عامل کنترل فرآیند به مخلوط ها اضافه شد. نسبت وزن توپ به پودر ۱:۱۰ و سرعت چرخش روی ۲۵۰ دور در دقیقه تعیین شد. پس از فرآیند آسیاب، از پرس گرم برای تولید نمونه‌ها استفاده شد، محصولات از طریق قالب گرافیتی به قطر ۱۵ میلی متر همزمان با سرعت گرمایش ۱۰ درجه سانتیگراد در دقیقه تا دمای پخت نهایی ۵۱۰ درجه سانتیگراد با زمان نگهداری ۳۰ دقیقه تحت خلا در فشار ۵۰ مگاپاسکال در دستگاه پرس گرم قرار گرفت.

نمونه های نهایی با قطر ۱۵ میلی متر و ارتفاع ۱۵ میلی متر تولید شدند. برای مشاهده فازهای تشکیل شده از آنالیز XRD استفاده شد. برای آزمایش فشار نمونه‌های تولید شده با روش پرس گرم به ابعاد قطر ۱۵ میلی متر و ضخامت ۱۵میلی متر از دستگاه آزمون کشش/ فشار یونیورسال Roell Amsler استفاده شد. سطوح شکست نمونه‌ها توسط SEM مورد بررسی قرار گرفت.

نتایج و بحث

آنالیز XRD

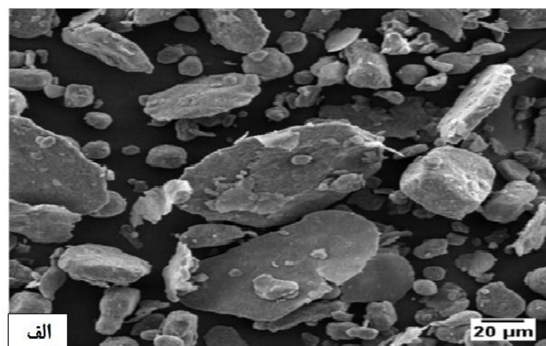
شکل (۳) آنالیز فازی کامپوزیت تولید شده با درصدهای وزنی مختلف SiC را نشان می‌دهد. از روی این شکل، پیک‌های مربوط به دو فاز آلومینیوم و سیلیسیم مشاهده می‌شود. به دلیل این که مقدار تقویت‌کننده‌ها کم هست در هیچ کدام از نمونه‌ها دیده نمی شود و همچنین دمای زینترینگ به حدی نبود که باعث تجزیه SiC و ایجاد ترکیب بین فلزی آلومینیوم با کربن یا آلومینیوم با سیلیسیم شود. افزون بر آن، به دلیل کنترل اتمسفر آسیاب کاری و زینترینگ، ترکیب ناخواسته اکسیدی نیز مشاهده نگردید.

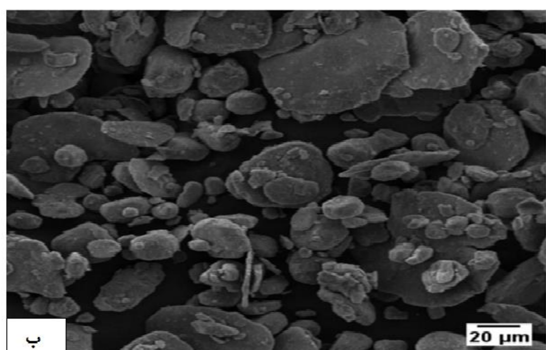


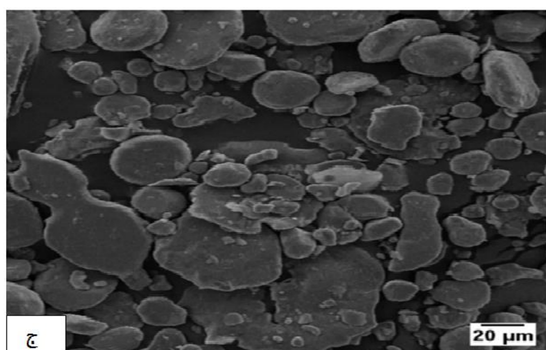
شکل ۳ آنالیز XRD پودر Al A380 با درصدهای وزنی مختلف نانوذرات SiC

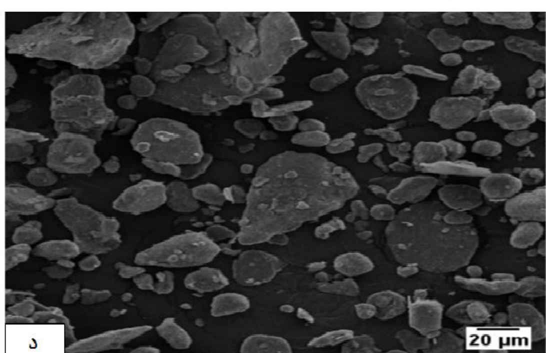
مورفولوژی پودرها

قبل از آسیاب گلوله‌ای، مورفولوژی پودر آلیاژ آلومینیوم کروی و اندازه ذرات که با نرم افزار Image J اندازه گیری شد تقریباً ٤٠ میکرومتر بود. شکل (٤) تصاویر SEM مورفولوژی پودرهای نانوکامپوزیت AlA380-SiC را پس از ۱۰ ساعت آسیاب نشان می‌دهد. مشاهده می شود پودرهای نانوکامپوزیت پس از فرآیند آسیاب به مورفولوژی مسطح تبدیل شدند. با این حال، در مورد ۲ درصد وزنی SiC ، مورفولوژی پودرها ریزتر شده است به این علت که ذرات سخت SiC مشابه گلوله‌های آسیاب می‌توانند منجر به انتقال انرژی به زمینه فلزی گردد. همچنین افزودن ذرات سخت منجر به کاهش چقرمگی شکست پودرهای آلیاژ آلومینیوم می‌شود به همین دلیل مکانیزم شکست در فرآیند آسیاب پودرهای کامپوزیتی با ۲ درصد وزنی SiC زودتر فعال شده و پودر ها ریزتر می‌شود. همچنین در نمونه‌های بدون تقویت‌کننده جوش سرد اتفاق افتاده است و اندازه دانه ها بزرگ‌تر شده است [13].





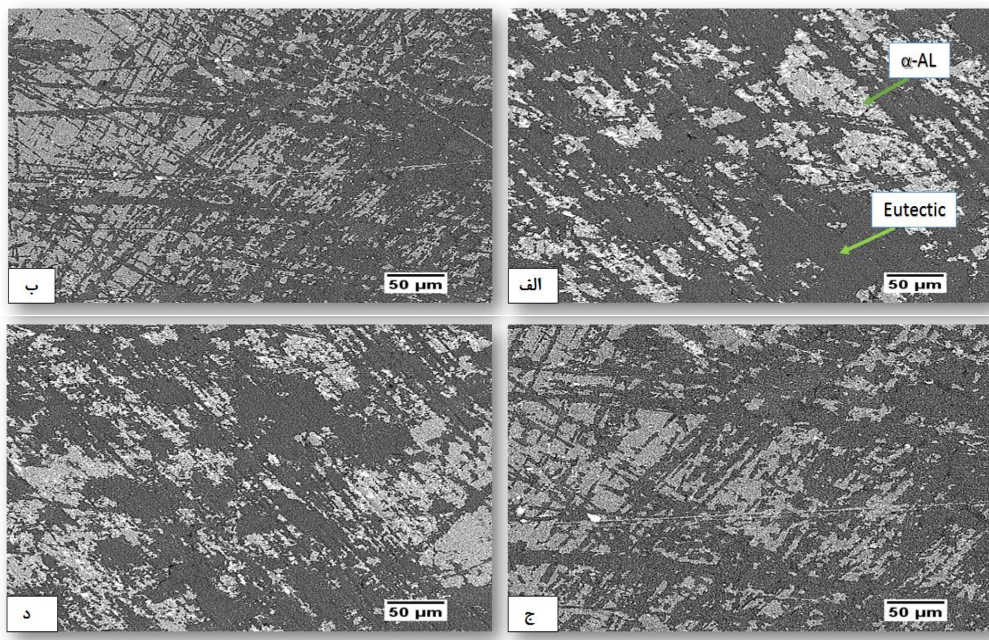




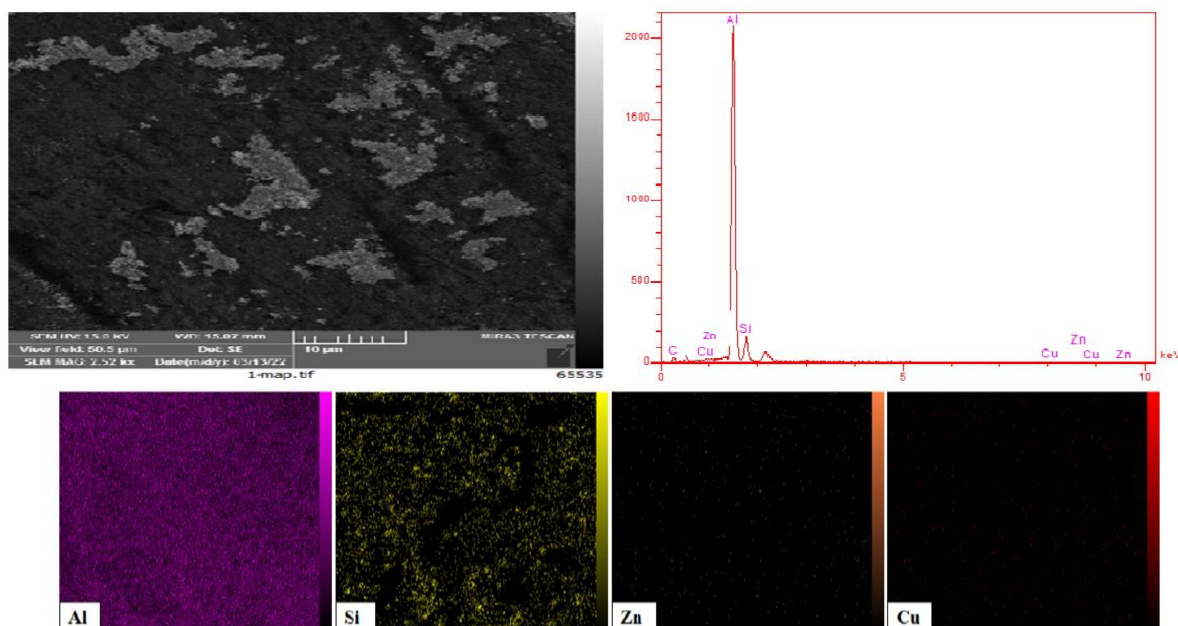
شکل ٤ مورفولوژی پودرها پس از ۱۰ ساعت آسیاب : (الف) آلیاژ آلومینیوم، (ب) آلیاژ الومینیوم با نیم درصد وزنی نانوذرات کاربید سیلیسیم، (ج) آلیاژ آلومینیوم با یک درصد نانوذرات کاربید سیلیسیم، (د) آلیاژ آلومینیوم با دو درصد نانوذرات کاربید سیلیسیم

تصاویر SEM

شکل (۵) تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی نمونه ها با درصدهای وزنی مختلف را نشان می‌دهد. طبق دیاگرام فازی آلومینیوم- سیلیسیم به علت اینکه مقدار سیلیسیم در آلیاژ آلومینیوم A380 کمتر از ۱۲/٦ درصد هست آلیاژ آلومینیوم در منطقه هیپو یوتکتیک قرار گرفته است و به همین علت فازهای آلفا آلومینیوم و یوتکتیک تشکیل داده است. با استفاده از آنالیز Map آلیاژ Al A380، پراکندگی عناصر تشکیل دهنده نمونه مشاهده می‌شود (شکل٦). مناطقی که عنصر سیلیسیم کمتری دارد تشکیل فاز آلفا آلومینیوم و بقیه مناطق فاز یوتکتیک تشکیل داده است، همچنین به دلیل اینکه درصد وزنی نانوذرات کاربید سیلیسیم کم هست تغییری در فازهای تشکیل شده مشاهده نمی‌شود [14].



شکل ۵ تصاویر FE-SEM: (الف) آلیاژ آلومینیوم، (ب) آلیاژ الومینیوم با نیم درصد وزنی نانوذرات کاربید سیلیسیم، (ج) آلیاژ آلومینیوم با یک درصد نانوذرات کاربید سیلیسیم، (د) آلیاژ آلومینیوم با دو درصد نانوذرات کاربید سیلیسیم



شکل ٦ نتایج EDX و آنالیز Map نمونه آلیاژ Al A380

استحکام فشاری

استحکام فشاری آلیاژ آلومینیوم با افزودن تقویت‌کننده های نانو ذرات کاربید سیلیسیم تحت مکانیزم‌های مختلفی قرار می‌گیرد.

۱. ضریب انبساط حرارتی کاربید سیلسیم ۴×۱۰^{-۶} بر درجه سانتی گراد و ضریب انبساط حرارتی آلیاژ آلومینیوم A380 $۲۱/۸\times ۱۰^{-۶}$ بر درجه سانتی‌گراد است، یعنی حدوداً ضریب انبساط حرارتی آلیاژ آلومینیوم ۵/۵ برابر کاربید سیلیسیم است [15]. در هنگام سرد شدن به علت اختلاف در مقدار کاهش طول، ریز ترک در اطراف ذره تقویت‌کننده و فاز زمینه ایجاد می شود. این ریز ترک ها باعث افزایش چگالی نابجایی‌ها در نتیجه استحکام فشاری افزایش پیدا می‌کند.

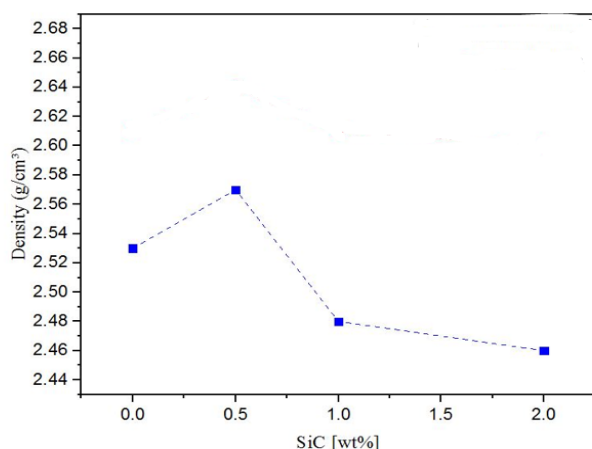
۲. نانو ذرات به عنوان موانعی بر سر ایجاد رشد ترک هستند و از رشد ترک جلوگیری می‌کنند افزودن نانو ذرات باعث افزایش استحکام فشاری می‌شود.

۳. پودر های آلیاژ آلومینیوم با افزایش مقدار نانو ذرات SiC ریزتر می شود همان طور که در شکل (٤) مشاهده می شود، به این علت که ذرات سخت SiC مشابه گلوله‌های آسیاب، می‌توانند منجر به انتقال انرژی به زمینه فلزی گردد.

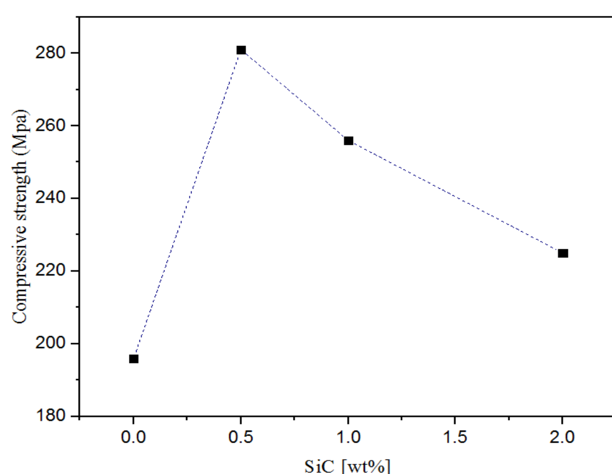
٤. افزودن ذرات سخت منجر به کاهش چقرمگی شکست پودر های آلیاژ آلومینیوم می شود به همین دلیل مکانیزم شکست در فرآیند آسیاب پودرهای کامپوزیتی با ۲ در صد وزنی SiC زودتر فعال شده و پودرها ریزتر می شود. و طبق اثر هال ـ پچ مرزدانه‌ها مانع حرکت نابجایی‌ها می شوند و همچنین تعداد نابجایی های درون یک دانه در به وجود آمدن تنش تاثیر گذارند. بنابراین با تغییر اندازه دانه میتوان بر تجمع نابجایی‌های درون دانه و در نتیجه استحکام تاثیر گذاشت و طبق همین اثر با کاهش اندازه دانه‌ها، استحکام فشاری افزایش پیدا می‌کند [16].

۵. افزودن نانو ذرات حالت بهینه دارد و با افزایش بیشتر نانو ذرات کاربید سیلیسیم باعث اگلومره شدن ذرات تقویت‌کننده می‌شود و به همین علت طبق نمودار شکل (۷) باعث کاهش چگالی می‌شود و تخلخل ها به عنوان محلی برای جوانه زنی و رشد ترک عمل می‌کنند.

طبق نمودار شکل (۸) مشاهده می شود با افزودن نانو ذرات کاربید سیلیسیم، استحکام فشاری نمونه‌ها ابتدا افزایش پیدا می‌کند به دلیل اینکه با افزایش نانو ذرات کاربید سیلیسیم باعث کاهش میانگین اندازه پودرهای آلیاژ آلومینیوم طبق بررسی با نرم افزار Image J می‌شود و طبق اثر هال-پچ باعث افزایش استحکام فشاری می‌شود همچنین نانو ذرات کاربید سیلیسیم به عنوان موانعی، از رشد ترک جلوگیری می‌کند و به علت اختلاف ضریب انبساط حرارتی نانو ذرات کاربید سیلیسیم و پودرهای آلیاژ آلومینیوم هنگام سرد شدن بعد زینترینگ باعث افزایش چگالی نابجایی‌ها می شود اما مقدار بهینه‌ی در نمودار مشاهده می شود زیرا با افزایش بیشتر نانو ذرات کاربید سیلیسیم به یک و دو درصد وزنی به علت اگلومره شدن نانو ذرات و کاهش چگالی و ایجاد تخلخل باعث کاهش استحکام فشاری می‌شود.



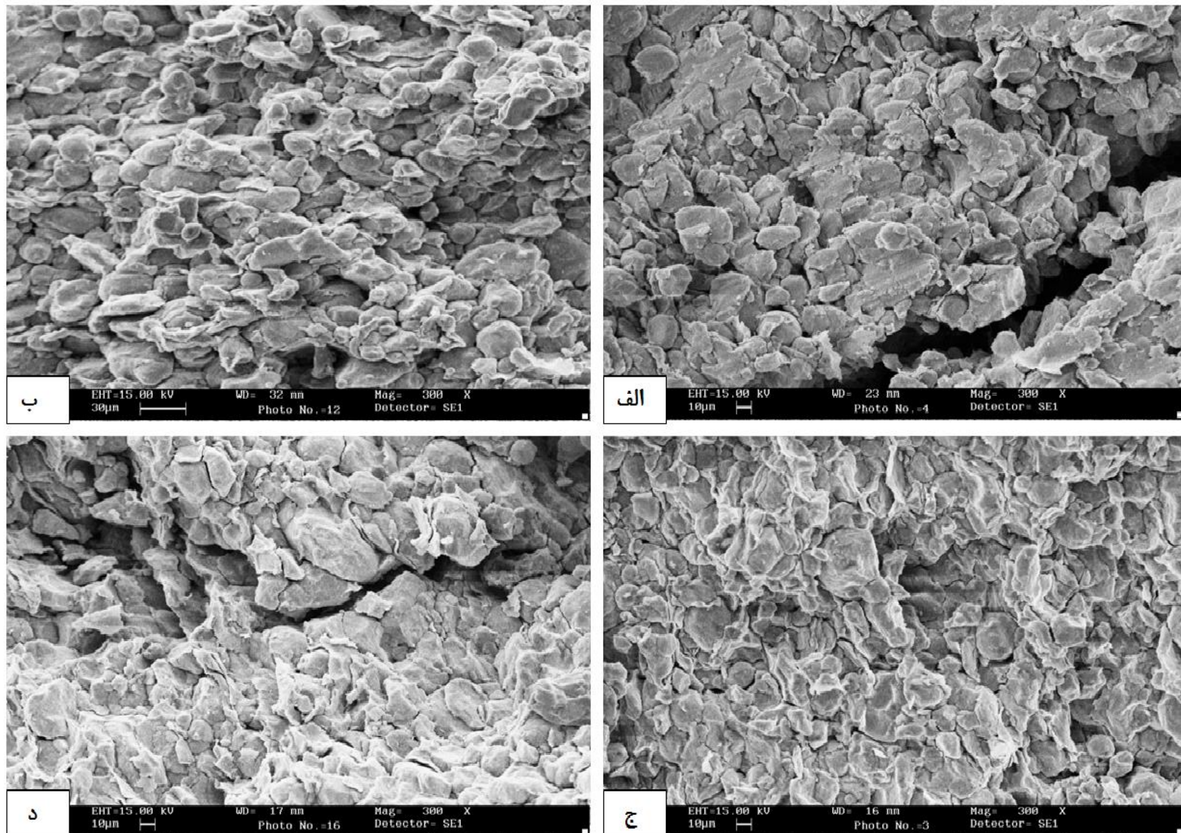
شکل ۷ نمودار تغییرات دانسیته (g/cm^3) با افزایش کاربید سیلیسیم



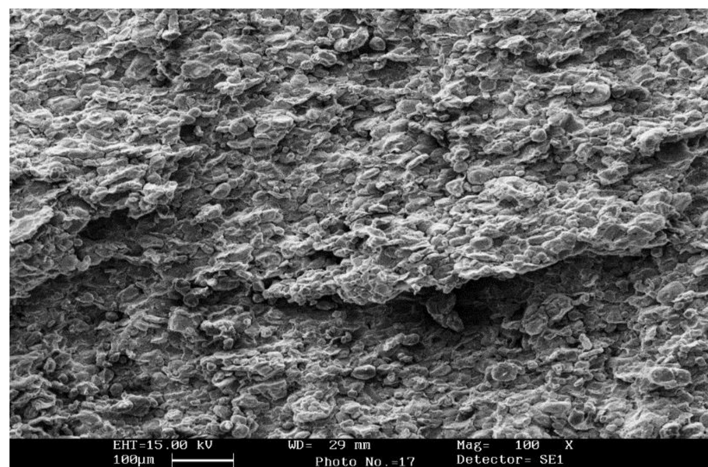
شکل ۸ نمودار تغییرات استحکام فشاری (Mpa) با افزایش کاربید سیلیسیم

شکل (۹) تصاویر SEM سطح شکست نمونه ها تحت آزمون فشار را نشان می‌دهد تصاویر نشان داده شده در شکل (۹) مبین آن است که شکست ترکیبی از شکست درون دانه‌ای و مرزدانه‌ای است. همینطور که در شکل (۱۰) مشاهده می شود سطح شکست با افزایش مقدار نانو ذرات به نیم در صد وزنی،

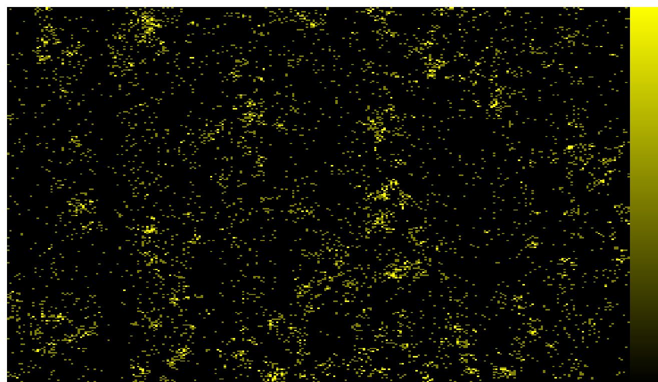
ترک‌ها به دلیل اینکه نانوذرات به عنوان موانعی از رشـــد ترک جلوگیری می‌کنند، کاهش پیدا می‌کند ولی با افزایش نانو ذرات به مقادیر بیشـــتر به علت اگلومره شـــدن نانوذرات SiC مطابق شـکل (۱۱) و چون نانوذرات با پیوند ضـعیف واندروالس کنار هم نگه داشـته شـده‌اند همچنین به علت وجود تخلخل به دلیل کاهش چگالی با افزایش کاربید سـیلیسـیم، مطابق شـکل (۱۲) شکست به صورت مرزدانه بیشتر اتفاق می‌افتد [17,18].



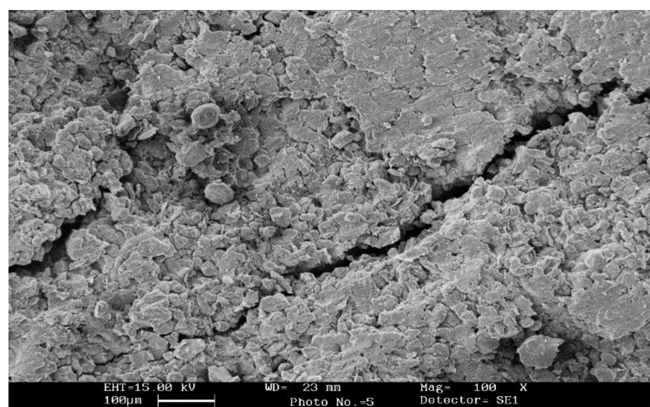
شکل ۹ تصاویر SEM سطح شکست: (الف) آلیاژ آلومینیوم، (ب) آلیاژ الومینیوم با نیم درصد وزنی نانوذرات کاربید سیلیسیم، (ج) آلیاژ آلومینیوم با یک درصد نانوذرات کاربید سیلیسیم، (د) آلیاژ آلومینیوم با دو درصد نانوذرات کاربید سیلیسیم



شکل ۱۰ سطح شکست نمونه با نیم درصد وزنی نانو ذرات کاربید سیلیسیم



شکل ۱۱ آنالیز Map عنصر سیلیسیم از سطح شکست نمونه با دو درصد وزنی نانو ذرات کاربید سیلیسیم



شکل ۱۲ سطح شکست نمونه با دو درصد وزنی نانو ذرات کاربید سیلیسیم

نتیجه گیری

در این پژوهش اثر افزودن نانوذرات کاربید سیلسیم بر روی خواص مکانیکی و ریز ساختار آلیاژ آلومینیوم A380 مورد بررسی قرار گرفت مهمترین نتایج این تحقیق را می توان در موارد زیر خلاصه نمود :

۱. به دلیل اینکه مقدار نانو ذرات کم است با افزودن نانو ذرات کاربید سیلیسیم تغییری در فازهای تشکیل دهنده نمونه‌ها اتفاق نمی‌افتد.

۲. بیشترین استحکام فشاری با افزودن نیم درصد وزنی کاربید سیلیسیم اتفاق می افتد و با افزایش بیشتر نانو ذرات به علت اگلومره شدن و کاهش چگالی، استحکام فشاری کاهش پیدا می‌کند.

۳. با افزایش بیشتر مقدار نانو ذرات ، شکست به صورت مرز دانه‌ای اتفاق می‌افتد.

مراجع

[1] M., Moazami-Goudarzi, and F., Akhlaghi, "Effect of SiC nanoparticles content and Mg addition on the characteristics of Al/SiC composite powders produced via in situ powder metallurgy method", *Particulate Science and Technology*, vol. 31, no. 3, pp. 234–240, (2013).

[2] Kim, Chang-Soo, et al. "Mechanical performance of particulate-reinforced Al metal-matrix composites (MMCs) and Al metal-matrix nano-composites (MMNCs)." Journal of Materials Science , vol. 52, no. 23, pp. 13319–13349, (2017).

[3] M., Meignanamoorthy, et al. "Microstructure, mechanical properties, and corrosion behavior of boron carbide reinforced aluminum alloy (al-Fe-Si-Zn-Cu) matrix composites produced via powder metallurgy route", *Materials*,

vol. 14, no. 15, pp. 4315, (2021).

[4] J., Kumar, et al. "Investigation on the mechanical, tribological, morphological and machinability behavior of stir-casted Al/SiC/Mo reinforced MMCs", *Journal of Materials Research and Technology*, vol. 12, pp. 930–946, (2021).

[5] Surya, Mulugundam Siva, and T., Venkata Nilesh, "Synthesis and mechanical behaviour of (Al/SiC) functionally graded material using powder metallurgy technique", *Materials Today: Proceedings*, vol. 18, pp. 3501–3506, (2019).

[6] Bodukuri, Anil Kumar, et al. "Fabrication of Al–SiC–B_4C metal matrix composite by powder metallurgy technique and evaluating mechanical properties", *Perspectives in Science*, vol. 8, pp. 428–431, (2016).

[7] O., El-Kady, and A., Fathy, "Effect of SiC particle size on the physical and mechanical properties of extruded Al matrix nanocomposites", *Materials & Design*, vol. 54, pp. 348–353, (2014).

[8] X., Zeng, et al., "Wear characteristics of hybrid aluminum-matrix composites reinforced with well-dispersed reduced graphene oxide nanosheets and silicon carbide particulates", *Vacuum*, vol. 155, no. 4, pp. 364–375, (2018).

[9] Bodukuri, Anil Kumar, et al. "Fabrication of Al–SiC–B4C metal matrix composite by powder metallurgy technique and evaluating mechanical properties", *Perspectives in Science*, vol. 8, pp. 428–431, (2016).

[10] Lotfi, B., Rostami, M., and Z., Sadeghian, "Effect of silicon content on microstructure of Al-Si/SiCp composite layer cladded on A380 Al alloy by TIG welding process", *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, vol. 24, no. 9, pp. 2824–2830, (2014).

[11] K., Karvanis, D., Fasnakis, A., Maropoulos, and S., Papanikolaou, "Production and mechanical properties of Al-SiC metal matrix composites", *In IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, vol. 161, no. 1, pp. 012070. IOP Publishing, (2016).

[12] Şenel, Mahmut Can, Mevlüt Gürbüz, and Erdem Koc. "Fabrication and characterization of synergistic Al-SiC-GNPs hybrid composites", *Composites Part B: Engineering*, vol. 154, pp.1-9,(2018).

[13] Rudianto, Haris, Yang Sang Sun, Kim Yong Jin, and Nam Ki Woo. "Sintering behavior of hypereutectic aluminum-silicon metal matrix composites powder", In *International Journal of Modern Physics: Conference Series*, vol. 6, pp. 628-63, (2012).

[14] Shankar, Sumanth, Yancy W. Riddle, and Makhlouf M. Makhlouf. "Eutectic solidification of aluminum-silicon alloys." *Metallurgical and Materials Transactions A*, vol. 35, no. 9, pp.3038-3043, (2004).

[15] Yang, Junrui, Lei Wang, Xinrong Tan, Qian Zhi, Ruibin Yang, Guopeng Zhang, Zhongxia Liu, Xianghong Ge, and Erjun Liang. "Effect of sintering temperature on the thermal expansion behavior of ZrMgMo3O12p/2024Al composite", *Ceramics International*, vol. 44, no. 9, pp. 10744 -10752, (2018).

[16] Ghasali, Ehsan, Rahim Yazdani-rad, Keivan Asadian, and Touradj Ebadzadeh. "Production of Al-SiC-TiC hybrid composites using pure and 1056 aluminum powders prepared through microwave and conventional heating methods", *Journal of Alloys and Compounds*, vol. 690, pp. 512–518, (2017).

[17] M., Akbari, H., Karbalaei, R., Baharvandi, and O., Mirzaee, "Nano-sized aluminum oxide reinforced commercial casting A356 alloy matrix: Evaluation of hardness, wear resistance and compressive strength focusing on particle distribution in aluminum matrix", *Composites Part B: Engineering*, vol. 52, pp. 262–268, (2013).

[18] R., Muraliraja, R., Arunachalam, I., Al-Fori, M., Al-Maharbi, and S., Piya, "Development of alumina reinforced

aluminum metal matrix composite with enhanced compressive strength through squeeze casting process", *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L: Journal of Materials: Design and Applications*, vol. 233, no. 3, pp. 307–314, (2019).